

四川盆地中部龙王庙组滩相储层特征及形成机制

代林呈¹, 王兴志¹, 杜双宇¹, 杨雪飞¹, 杨跃明²

(1 西南石油大学地球科学与技术学院; 2 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院)

摘要 依据岩心、常规薄片及铸体薄片、物性分析、压汞等资料的研究,四川盆地中部下寒武统龙王庙组滩相储层为发育良好的中低孔、低渗的孔隙型储层及裂缝—孔隙型储层。储集岩主要为砂屑白云岩、鲕粒白云岩与具残余颗粒结构的粉—细晶白云岩,储集空间主要包括粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔、铸模孔、残余粒间孔、裂缝及溶洞,孔喉配置关系好。储层形成机制研究表明,滩核和滩翼微相有利于储层发育,滩相储层在沉积早期具有典型的宏观非均质性,这为储层的形成与演化提供了物质基础。同生岩溶作用控制了早期储层的孔隙演化,表生岩溶作用决定了储层分布的基本特征,埋藏岩溶作用有利于先期孔渗层的优化改造。提出滩相储层的演化主要经历三个阶段,其中沉积—同生成岩阶段是早期优质储层形成的关键时期,表生岩溶改造阶段是滩相储层大规模增孔时期,埋藏成岩阶段为滩相储层孔隙调整和稳定时期。

关键词 龙王庙组; 滩相; 碳酸盐岩储层; 储层特征; 储层成因; 四川盆地中部

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

四川盆地中部的安岳气田是近年来四川盆地碳酸盐岩天然气勘探取得的重要突破^[1],其中的磨溪区块下寒武统龙王庙组探明含气面积779.9 km²,探明地质储量4 403.8×10⁸ m³,可采储量3082×10⁸ m³^[2]。龙王庙组已成为四川盆地内继长兴组、飞仙关组之后又一重要的产气层位,展现出巨大的勘探潜力^[3]。目前的研究表明,四川盆地中部龙王庙组以局限台地相颗粒滩沉积为主,主要受沉积古地貌、海平面升降及古水深等因素的控制^[4],区内滩相储层分布广泛,储集性能良好。对滩相储层主控因素的研究存在多种观点,其中普遍认为滩相储层的发育与演化主要受沉积、成岩和构造作用的联合控制^[5-8],但在岩溶作用的认识上存在着较大的分歧,争论的焦点是同生岩溶、表生岩溶以及埋藏岩溶何为成岩过程中改造滩相储层的关键因素^[2,9-10],这对于滩相储层的预测和评价有着重要影响。

本文基于四川盆地中部磨溪—高石梯区块19口典型钻井的龙王庙组岩性和薄片资料以及相应单井样品的实验分析数据,对研究区龙王庙组滩相储层的岩性、物性、储集空间和孔隙结构等储层特征进行

研究,并在此基础上,结合区域构造演化,探讨龙王庙组滩相储层的形成机制,以期为区内后期的油气勘探及开发提供有益的地质资料。

1 区域地质概况

四川盆地中部是指位于川中平缓构造区东段的上斜坡部位(图1),主体构造属于乐山—龙女寺古隆起上的一个次级隆起^[11]。区内寒武系发育齐全,由下至上划分为筇竹寺组、沧浪铺组、龙王庙组、高台组以及洗象池群^[12]。研究区内龙王庙组与下伏沧浪铺组和上覆高台组均成整合接触,岩性以颗粒白云岩和晶粒白云岩为主(图2)。

研究区龙王庙组沉积时经历了一次大规模海退事件,由于周边古陆的作用,再加上全球性气候变化的影响,在整体海退的基础上,又经历了两次次一级的快速海侵—缓慢海退的海平面升降变化,据此可将龙王庙组由下至上划分为两个段。每段底部为深灰色泥晶白云岩、泥质白云岩及含泥质条带的泥晶白云岩,中上部为浅灰色砂屑白云岩、鲕粒白云岩与具残余颗粒结构的晶粒白云岩,顶部为晶粒白云岩与砂质

收稿日期: 2015-04-23; 改回日期: 2015-07-21

本文受四川省重点学科建设项目(项目编号:SZD0414)资助

代林呈: 1991年生,硕士研究生。主要从事沉积储层地质学研究。通讯地址: 610500 四川省成都市新都区; E-mail: 1197861302@qq.com

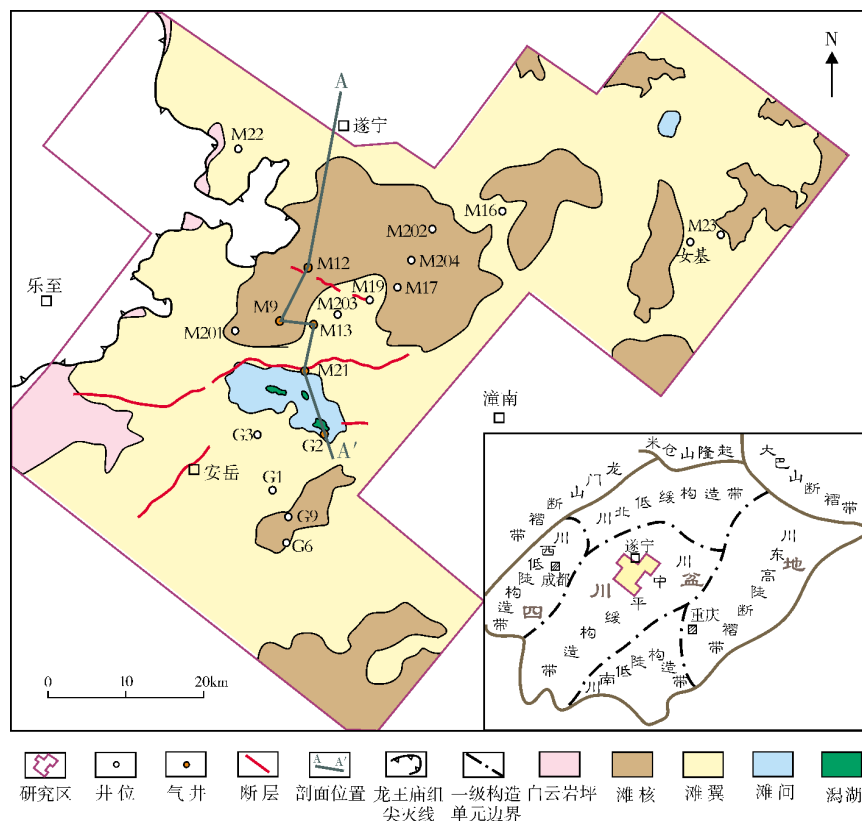


图 1 四川盆地中部龙王庙组沉积微相及构造位置分布图

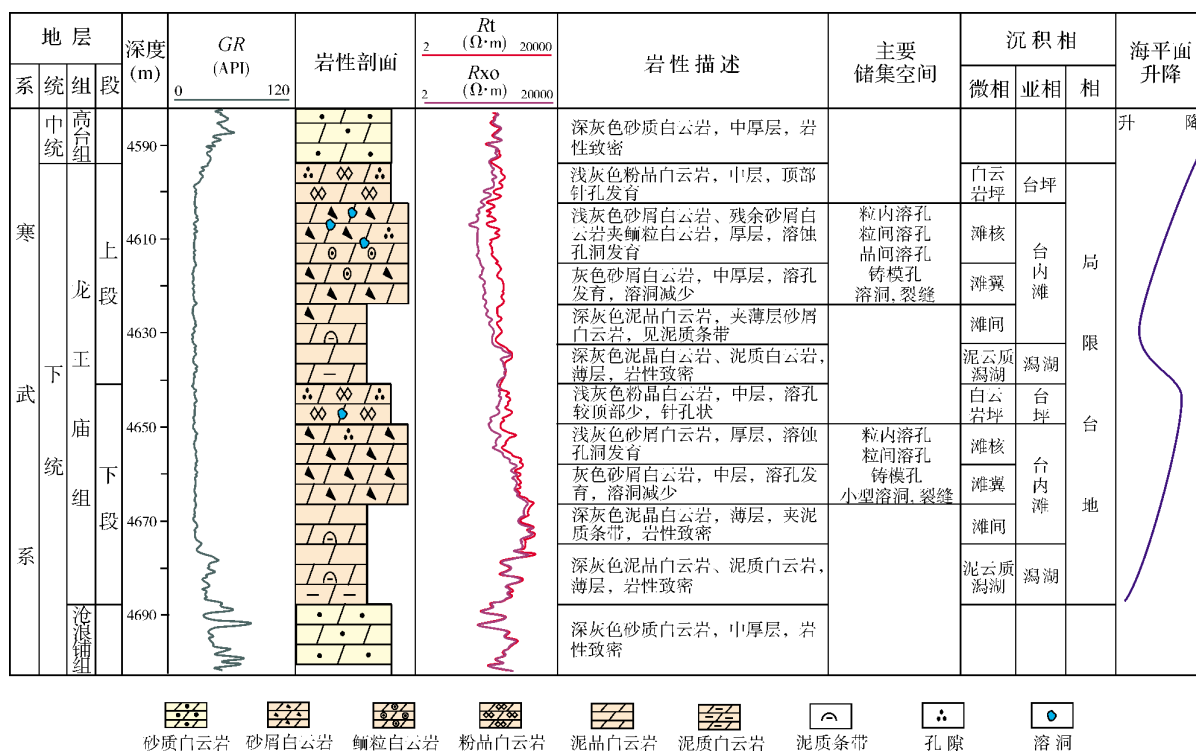


图 2 四川盆地中部 M12 井龙王庙组地层综合柱状图

白云岩(图2)。区内的滩相储层主要发育于各段中上部的颗粒白云岩与具残余颗粒结构的晶粒白云岩中。

四川盆地早寒武世龙王庙组处于上扬子台地西北部边缘^[13],整体上为西浅东深的碳酸盐岩台地沉积格局,川中地区龙王庙组以发育局限台地相为特征,其中主要包括台坪、台内滩、局限潟湖等亚相,并可进一步识别出白云岩潮坪、滩核、滩翼、滩间、泥云质潟湖等微相(图1,图2)。

2 滩相储层特征

2.1 储集岩特征

对四川盆地中部8口井龙王庙组400块样品的宏观及微观资料的分析表明,龙王庙组岩石类型多样,其中以碳酸盐岩占绝对优势,滩相储层主要赋存于砂屑白云岩、鲕粒白云岩与具残余颗粒结构的粉—细晶白云岩中(图2)。

砂屑白云岩 砂屑颗粒由泥晶—粉晶白云石组

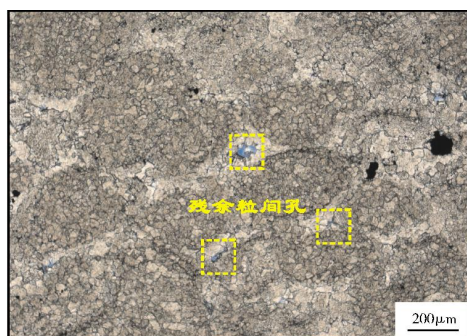
成,含量50%~80%,粒径一般0.8~1.2 mm,磨圆度较好,呈椭圆状或圆状;分选中等—较好;粒间多见纤状或短柱状白云石组成的栉壳环边和粒状亮晶白云岩胶结物。单滩体上部的砂屑白云岩中溶蚀孔洞发育(图3a),下部岩性致密(图3b)。

鲕粒白云岩 鲕粒由粉晶—细晶白云石组成,含量50%~80%,粒径在0.5~1.0 mm,磨圆较好,分选中等—较好,粒间和粒内溶孔发育(图3c)。区内鲕粒白云岩的含量较砂屑白云岩少,单层厚度为2~8cm,多以中薄层形式夹于砂屑白云岩中。

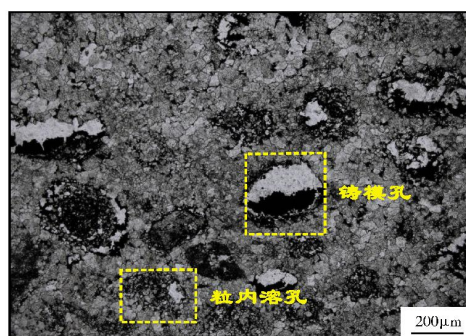
具残余颗粒结构的粉—细晶白云岩 由粉晶—细晶白云石组成,晶粒大小不一,一般在0.05~0.12mm;晶形以半自形为主,颗粒结构已被破坏,仅见颗粒幻影,晶间溶孔发育(图3d)。

2.2 储集空间类型

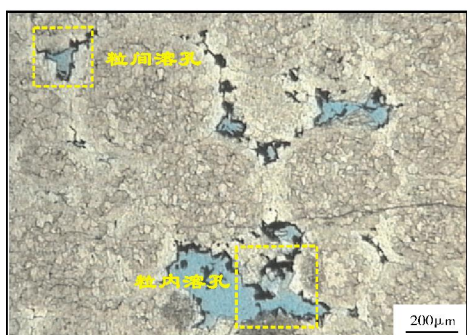
研究区龙王庙组滩相储层的储渗空间成因复杂,类型较多,以次生成因的孔、缝、洞为主,偶见



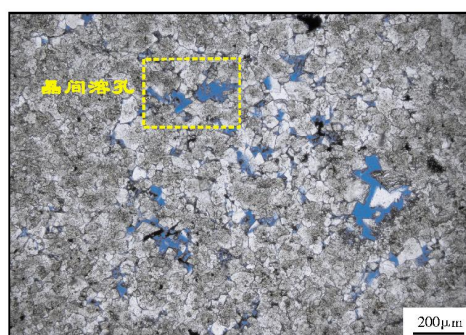
(a) 砂屑白云岩。滩翼部位。砂屑颗粒呈椭圆状定向排列,残余粒间孔发育。M12井4630.74m。蓝色铸体薄片,(-)



(b) 砂屑白云岩。滩核部位。粒内溶孔及铸模孔,被黏土、白云石等矿物充填。M12井4611.03m。常规薄片,(-)



(c) 鲕粒白云岩。滩核部位。鲕粒呈圆状,粒间溶孔及粒内溶孔发育,沥青呈飘带状充填。M12井4624.14m。蓝色铸体薄片,(-)



(d) 粉晶白云岩。滩核部位。具残余颗粒结构,颗粒结构已被破坏,仅见颗粒幻影;白云石以半自形为主;晶间溶孔发育。M12井4616.33m。蓝色铸体薄片,(-)

图3 四川盆地中部龙王庙组储层岩石结构特征及储集空间类型

残余原生孔隙。通过对研究区5口井的246块储层薄片进行分析,其孔隙主要有5种类型,其中以粒间溶孔、晶间溶孔和粒内溶孔为主,其次为铸模孔

和残余粒间孔(表1)。裂缝主要是构造缝和溶蚀缝。裂缝和溶蚀孔洞对研究区的油气储渗也具有较大的贡献。

表1 四川盆地中部龙王庙组滩相储层孔隙类型统计

孔隙类型	粒间溶孔	晶间溶孔	粒内溶孔	铸模孔	残余粒间孔	其他孔隙
占总孔隙的体积比(%)	30.73	27.39	20.81	11.33	7.02	2.72

粒间溶孔 为粒间孔经溶蚀扩大形成,孔隙边缘常有溶蚀圆滑的现象和胶结物的残余部分。基本分布于整个滩体,但位于单滩体中上部的粒间溶孔孔径较大,数量较多,连通性较好(图3c)。

晶间溶孔 由晶间孔经后期溶蚀扩大形成,孔隙边缘具明显的港湾状、孤岛状痕迹。总体上分布在单滩体中上部的晶粒白云岩中(图3d)。

粒内溶孔 为颗粒内部被部分溶解后的产物,形态不规则。多分布于单滩体的中上部(图3b、3c)。

铸模孔 为颗粒全部被溶蚀形成的孔隙,保留颗粒的外部形态,多呈圆形—次圆形。集中分布于单滩体的上部(图3b)。

残余粒间孔 为颗粒间被胶结物或基质充填后的残余部分,呈不规则多边形。多分布于单滩体的中

下部(图3a)。

构造缝 多以高角度缝出现,宽度一般为0.8~1.2 mm,充填程度低,有效性好(图4a)。主要分布于滩体上部溶蚀孔洞发育区和滩体下部的致密岩层中,区内主要储集层段构造缝密度可达5.4~10.1条/m。

溶蚀缝 宽度一般大于1 mm,形态不规则,缝壁不平整(图4b)。多发育于滩体中上部溶蚀作用强烈区域。

溶洞 主要分布于滩体中上部,洞径一般2~20 mm,最大可达50 mm以上(图4c)。受溶蚀作用的影响,溶洞多为顺层拉长状在滩相储层中呈层状稳定分布,连通性好,充填程度低。垂向溶洞发育较少,仅在个别井段可见,大多被来源于上覆地层的泥质、黄铁矿等半充填—近全充填,有效性差。



(a) 砂屑白云岩。滩核部位。浅灰色,厚层;高角度构造缝发育,充填程度低。M13井4618.59m。岩心

(b) 砂屑白云岩。滩核部位。浅灰色,厚层;溶蚀缝发育,缝壁不规则,被白云石、石英等矿物半充填。M19井4924.84m。岩心

(c) 砂屑白云岩。滩核部位。浅灰色,厚层;溶蚀孔洞发育,呈蜂窝状。M13井4615.36m。岩心

图4 四川盆地中部龙王庙组滩相储集空间类型

2.3 物性特征

通过对研究区3口井共158块样品的常规物性分析(图5)可知,孔隙度平均值为5.06%,其中孔隙度在2%~8%之间的占样品总数的79.03%。渗透率平均值为 $2.27 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占样品总数的13.15%,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样

品占样品总数的86.85%。龙王庙组滩相储层总体上呈中低孔、低渗特征。

由孔—渗关系图(图6)可知,储层的孔渗关系具有明显的分区性:A区的孔渗关系相关性明显——渗透率随孔隙度的增大而增大;A区斜率值较低,表明随着孔隙度的增加,渗透率上升程度不大;裂缝对该类储层的孔隙度影响较小,孔隙结构简单,为孔隙

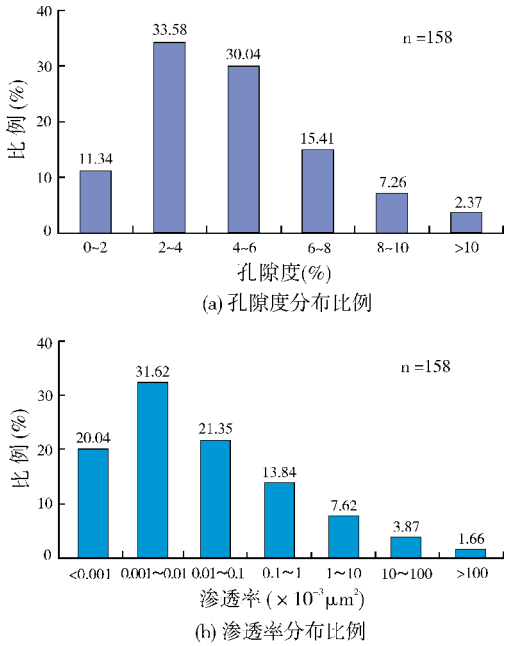


图5 四川盆地中部龙王庙组储层孔隙度和渗透率分布直方图

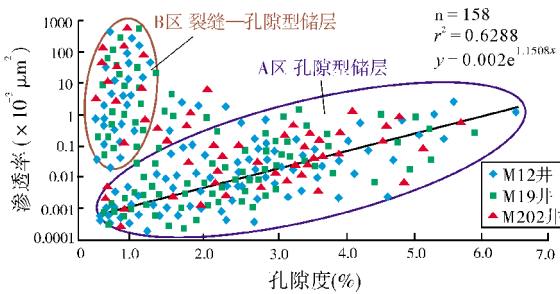
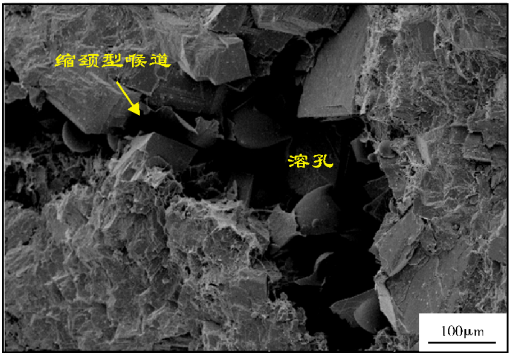


图6 四川盆地中部龙王庙组滩相储层孔—渗关系图

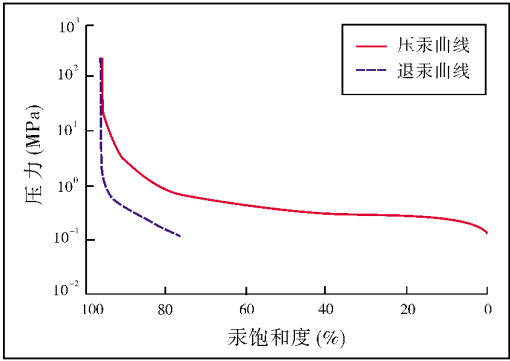
型储层。B区的孔渗关系不存在明显的相关性,孔隙度变化不大,而渗透率变化较大,同时在孔隙度较低时,渗透率可高达 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,这表明该类储层受裂缝影响较大,为裂缝—孔隙型储层。由此认为,龙王庙组滩相储层主要表现为孔隙型储层及裂缝—孔隙型储层两种类型。

2.4 孔隙结构

龙王庙组滩相储层孔隙间的喉道以缩颈型喉道(图7a)为主,中值喉道半径较大,为 $0.44 \sim 9.78 \mu\text{m}$,平均 $4.15 \mu\text{m}$;排驱压力较低,为 $0.33 \sim 18.74 \text{MPa}$,平均 5.17MPa ;退汞效率较高,为 $7.31\% \sim 48.84\%$,平均为 27.98% (表2)。压汞曲线表现为排驱压力较低,中值压力较低,分选好,粗歪度,呈凹型曲线形态特征(图7b)。这些特征均表明龙王庙组滩相储层孔隙结构较好,孔喉配置较为有利,具有较好的渗透能力。



(a) 砂屑白云岩。滩核。粒间溶孔发育,喉道为缩颈型喉道。M13井4610.64m,龙王庙组上段。扫描电镜



(b) 滩相储层典型压汞曲线。具残余砂屑结构的粉晶白云岩,富溶蚀孔洞,滩核。M202井4637m,龙王庙组上段

图7 四川盆地中部龙王庙组滩相储层典型压汞曲线与孔喉结构

表2 四川盆地中部龙王庙组滩相储层压汞数据统计

井 名	中值喉道半径 (μm)		排驱压力 (MPa)		退汞效率 (%)		样品数
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	
M12 井	0.56~9.78	4.22	0.33~12.03	4.97	7.78~45.33	27.41	8
M13 井	0.72~9.59	4.12	0.89~18.74	5.14	7.31~47.04	28.17	5
M202 井	0.44~9.32	4.01	1.02~16.67	5.22	8.33~48.84	28.02	5

3 滩相储层形成机制

3.1 颗粒滩相

研究区龙王庙组滩相储层为典型的相控型储层^[14],储层质量的优劣受沉积微相的控制^[15]。根据研究区龙王庙组滩相储层216块岩心物性样品分析资料(表3),储层储集性能最好的沉积微相是滩核微相,其次为滩翼微相,而滩间微相则最差。此外,区内滩核、滩翼微相往往发育于古微地貌相对高处(图1,图8),此地水体浅、能量高,海水淘洗作用充分,易于颗粒的形成和灰泥基质的带出。同时,受颗粒滩垂向加积和海平面变化等因素的影响,微地貌高地极易出露于海面,使颗粒岩接受大气淡水淋滤改造,利于后期溶蚀作用的进行。而滩间微相主要位于古地貌相对低处(图1,图8),长期处于水下环境,沉积水动力弱,水体能量低,储层质量差。

表3 四川盆地中部龙王庙组滩相储层不同沉积微相岩心孔隙度与渗透率统计

沉积微相	孔隙度 (%)		渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)		样品数
	范围	平均值	范围	平均值	
滩核	4.03~10.33	5.43	0.643~288.084	3.222	91
滩翼	2.21~5.88	4.56	0.231~97.713	1.217	70
滩间	0.34~2.77	1.34	0.071~7.136	0.476	55

由此可见,滩核和滩翼微相有利于储层发育,且沉积微相的平面分布使这种相控型碳酸盐岩储层在沉积早期就具有典型的宏观非均质性,这为储层的形成与演化提供了物质基础。

3.2 同生岩溶作用

同生岩溶作用发生于同生(或准同生)大气水环境中。龙王庙期,受川中乐山—龙女寺古隆起的影响,研究区所处的磨溪—高石梯构造为一继承性水下隆起。受次级沉积旋回和海平面升降变化等因素的控制,区内碳酸盐岩台地内部的颗粒滩等浅水沉积体伴随海平面暂时性相对下降而极易出露于海面,受到富含CO₂的大气淡水的淋滤,发生以选择性溶蚀为主的溶蚀作用,形成相应的岩溶结构。大气淡水既可以对文石、高镁方解石等不稳定矿物组成的

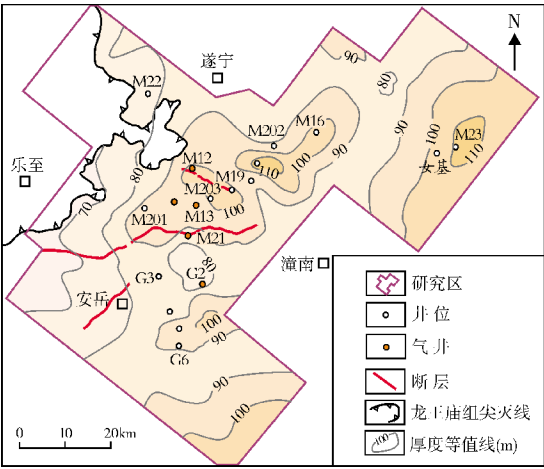


图8 四川盆地中部龙王庙组古地貌分布图

颗粒或第一期纤状胶结物进行选择溶蚀,形成粒内溶孔、铸模孔和粒间溶孔,又可以发生非选择性溶蚀,形成小型溶缝和溶洞。由于同生岩溶作用通常发生在文石、高镁方解石等不稳定矿物转变为稳定的低镁方解石之前,因此,铸模孔和粒内溶孔等构造选择性溶孔常被看作同生岩溶作用的主要识别标记之一^[16]。

储层配套分析表明,龙王庙组滩相储层中粒内溶孔及铸模孔(图3b)的发育,溶蚀孔隙部分被黏土、渗流粉砂等充填,早期淡水溶蚀特征明显。垂向上,滩体中上部在海平面相对下降时极易暴露,接受大气淡水淋溶,发生选择性溶蚀作用,形成粒内溶孔和铸模孔等构造选择溶孔发育的“针孔层”,滩体下部则处于海平面之下,发育海底潜流环境,溶蚀作用弱,方解石胶结作用占主导地位,形成致密层。因此,粒内溶孔和铸模孔集中分布于滩体的中上部(图2),且受同生岩溶作用控制的储层的发育也具有明显的纵向层位性。平面上,同生岩溶作用主要在M12井—M203井—M19井等微古地貌高地发育,而G2井—G3井等微古地貌低地则不发育(图8,表4),受同生岩溶作用控制的储层主要沿高能颗粒滩相带分布。

3.3 表生岩溶作用

受乐山—龙女寺古隆起构造演化的影响,四川盆地中部下寒武统龙王庙组自沉积埋藏后经历了多期构造抬升。加里东期中幕的都匀运动事件作用时间较短,且影响范围主要在盆地西部,对川中地区的影响较小(研究区奥陶系与寒武系之间呈整合接触),故

表4 四川盆地中部龙王庙组滩相储层岩溶作用特征统计

井 名	单井岩溶改造储层厚度(m)		小直径样品测试				
	表生岩溶	同生岩溶	孔隙度(%)		渗透率($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)		样品数
			范围值	平均值	范围值	平均值	
M12井	30.24	14.22	1.71~12.03	5.29	0.031~396.062	3.468	106
M13井	22.17	8.97	1.57~10.08	5.08	0.019~236.023	2.173	71
M19井	26.54	16.57	1.67~11.38	5.14	0.022~311.887	2.566	58
M21井	8.53	3.17	0.79~8.49	4.71	0.009~89.173	1.074	49
M201井	25.89	6.29	1.97~10.84	5.07	0.024~237.026	2.537	96
M202井	19.27	9.36	1.49~9.96	5.05	0.010~178.333	2.023	57
M203井	25.54	15.07	1.77~11.89	5.24	0.024~481.439	3.955	113
G2井	1.33	0	0.42~2.17	1.07	0.002~4.062	0.271	40
G3井	2.41	0	0.58~3.48	1.41	0.002~27.101	0.407	40
G9井	18.33	8.11	1.37~8.36	4.27	0.007~86.696	1.177	40

加里东期中幕的都匀事件对区内龙王庙组滩相储层的意义不大。至加里东期晚幕的广西运动事件,盆地自中志留世开始抬升剥蚀,一直到二叠纪才开始沉降接受沉积,暴露时间长达120Ma,这导致研究区西北部龙王庙组缺失或者直接暴露^[9]。在区内的其他区域,龙王庙组抬升至近地表环境,距二叠纪初期不整合面0~200m,平均100m左右,且越往东南方向,残余厚度越大(最大厚度可达300m左右),这有利于表生岩溶作用的进行。

综上所述,地表水经由研究区西北部龙王庙组露头区或区内高台组剥蚀区下渗,沿着龙王庙组先期孔渗层流动并溶蚀滩相储层。垂向上,由于上覆于龙王庙组的高台组岩性致密,对岩溶水具有阻挡作用,流体相对较难透过高台组向下运移而对龙王庙组地层进行溶蚀。因此,研究区龙王庙组滩相储层内部垂向溶洞溶沟较少(仅在个别井中常见),溶洞溶沟主要沿垂直裂缝分布,且常被黄铁矿、泥质及角砾等不同来源的物质半充填—近全充填(图9a,9b)。但由于四川盆地乐山—龙女寺古隆起的影响,研究区处于构造窗的东部,区内西北部龙王庙组露头区成为表生岩溶水的主要供给区,在压力梯度的影响下,岩溶水以顺层流动的方式溶蚀龙王庙组地层(图9c)。最显著的岩溶特征是出现大型的顺层拉长状溶蚀孔洞,这些孔洞呈层状稳定分布,充填程度低,连通性强。平面上,受表生岩溶改造的储集岩在各井区所占比例差异较大。

结合图8和表4可以看出,在M201井—M12井—M203井—M202井等微古地貌高地及其周缘斜坡部

位,岩溶水流动快,溶蚀能力强,受表生岩溶作用控制的储层储集性能好,表生岩溶改造明显;而在G2井—G3井等微古地貌低地,岩溶水活动弱,受表生岩溶作用影响的储层厚度减少,储集性能变差,表生岩溶发育程度降低。

3.4 埋藏岩溶作用

研究区龙王庙组滩相储层的埋藏岩溶作用发生于中—深埋藏阶段。存在埋藏岩溶作用的主要依据,一是在压溶缝合线基础上形成的溶蚀孔洞,二是沿微裂缝中可见少量串珠状溶孔。研究表明,龙王庙组滩相储层主要有两期埋藏岩溶作用。

第一期埋藏岩溶作用 主要与烃类充注有关。在中三叠世后,下寒武统筇竹寺组烃源岩开始成熟并进入大规模排烃期^[2],所释放出的含大量有机酸等腐蚀性组分的地层水沿颗粒滩中残余的孔隙层以及同生、表生岩溶作用形成的孔洞层运移,对早期孔隙及孔洞充填物进行扩容,形成溶蚀孔洞及溶扩缝等,随后大量石油充注。由于后期的石油热演化,现今这些储集空间中普遍赋存沥青(图9d,9e)。

第二期埋藏溶蚀作用 主要发生在液态烃裂解过程中,所生成的有机酸、CO₂、H₂S、CH₄等组分的酸性流体继续沿着地层薄弱部分对先期孔隙层进行溶蚀,所形成的孔洞一般较为干净(图9f),通常不含或少含沥青^[17]。

3.5 形成机制

根据上文分析,四川盆地中部龙王庙组滩相储

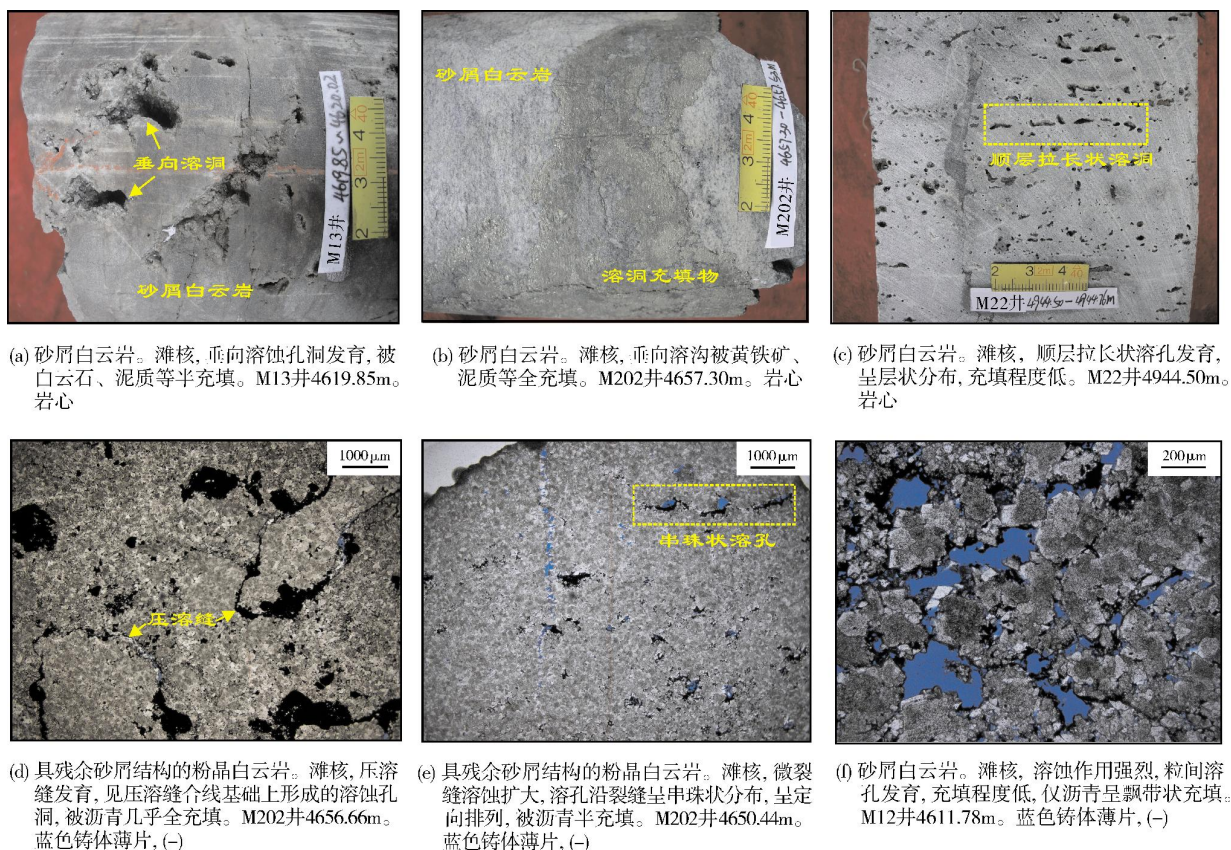


图9 四川盆地中部龙王庙组滩相储层岩溶作用特征

层形成的主控因素包括沉积相、同生岩溶作用、表生岩溶作用及埋藏岩溶作用, 其中颗粒滩相是储层形成的物质基础, 三种岩溶作用则是储层成岩演化过程中的重要保障。

同生岩溶作用控制了早期滩相储层的形成与分布, 但由于其形成的孔洞层的展布受沉积期古地貌、高能滩相和海平面升降的严格控制, 故其对储层的影响具有局限性。

与同生岩溶作用相比, 受表生岩溶作用控制的储层厚度明显增加(表4), 储集性能更好。在平面上, 受同生岩溶作用控制的储层主要沿古地貌相对高部位分布, 而表生岩溶的影响范围则是在古地貌高地及其周缘斜坡部位; 此外, 同生岩溶作用主要形成粒内溶孔及铸模孔等组构选择性溶孔, 表生岩溶作用主要形成粒间溶孔、溶扩缝及顺层拉长状溶洞, 溶蚀规模相对较大; 因此, 表生岩溶作用决定了储层分布的基本特征, 是影响储层形成的关键因素。

受沉积相、同生岩溶及表生岩溶的影响, 纵向上储层储集空间集中于单个沉积旋回的中上部,

具有明显的层位性; 平面上微地貌高地及周缘斜坡部位是储层发育的优势区, 储层分布不受区内断裂系统的控制, 而埋藏岩溶往往与断裂和深部流体改造联系紧密^[18-19], 埋藏岩溶作用不是滩相储层储集空间形成的主要因素, 其作用结果不改变滩相储层的基本特征与分布规律, 但有利于先期孔隙层的调整。

总而言之, 以上所述的三种岩溶作用对储层的影响具有连续性, 形成的孔隙分布空间具有继承性, 这种良好的时空耦合关系是区内龙王庙组滩相储层形成的根本原因。

4 储层演化

在龙王庙组滩相储层的储层特征及形成机制的研究基础之上, 可以将滩相储层的演化主要划分为以下三个阶段。

沉积—同生成岩阶段 主要经历了滩体沉积、海底胶结、同生岩溶作用以及准同生白云石化作用。龙王庙期, 研究区位于乐山—龙女寺古隆起的东南

翼,长期处于浪基面附近,发育了大面积连片分布的颗粒滩,这种滩体沉积时产生的原始孔隙可达30%~50%^[20],这为储层的形成和演化提供了物质基础(图2)。随后的海底胶结作用使得颗粒间被马牙状或纤状胶结物充填,加之早期的机械压实,孔隙度大幅下降,降低至5%~10%。在同生期,受海平面波动频繁及滩体垂向堆积的影响,位于古地貌高地的颗粒滩极易暴露于海面,同生岩溶进行选择性溶蚀,形成粒内溶孔及铸模孔等组构选择性溶孔发育的早期孔隙(洞)层(图10a)。与之伴生和滞后的准同生白云石化使得滩体沉积物转变为白云石,并产生少量的晶间孔。此外,白云石相比于方解石具有更强的抗压溶性质,可有效地减少孔隙的损失。在经过此阶段后,孔隙度增至10%~20%。

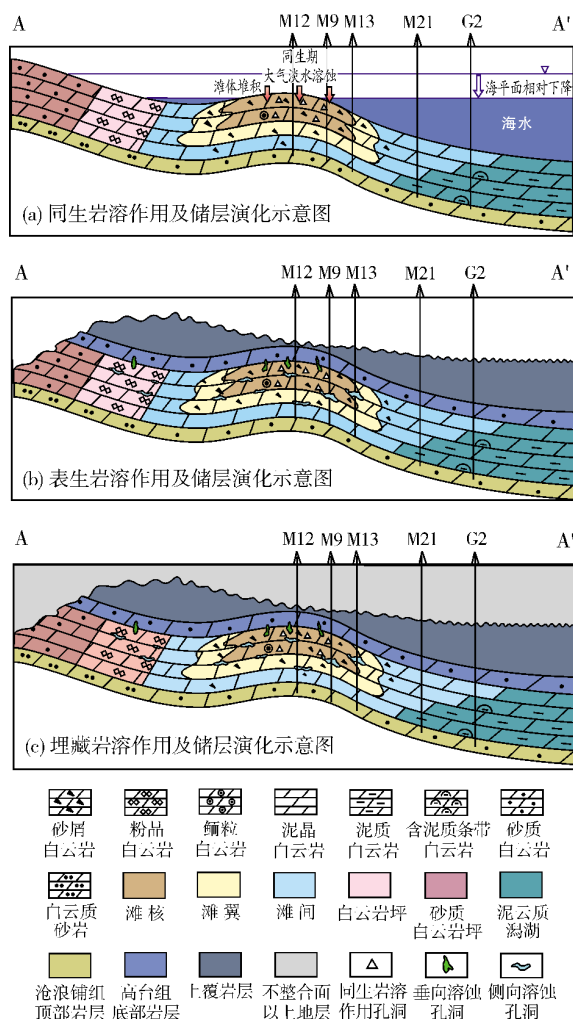


图10 四川盆地中部龙王庙组滩相储层成因模式

A—A'剖面位置见图1

表生岩溶改造阶段 主要发生在加里东末期。受构造抬升和乐山—龙女寺古隆起形成演化的影响,该期岩溶作用持续时间较长,可能持续到早二叠世,区内龙王庙组被整体抬升至地表—近地表环境。表生岩溶水沿研究区西北部龙王庙组露头区顺层运移或者由区内高台组剥蚀区下渗,溶蚀龙王庙组岩石,形成大量的粒间溶孔、晶间溶孔、溶扩缝以及顺层拉长状溶洞,垂向溶洞则发育较少(图10b)。该阶段为区内龙王庙组滩相储层大规模增孔阶段,表生岩溶作用后储层孔隙度增加至15%~30%。

埋藏成岩阶段 主要发生在中二叠世以后。随着地壳的下降,上覆沉积物逐渐增厚,温度、压力增高,滩相储层压实-压溶、胶结和充填作用强烈,孔隙度大幅减少(区内19口取心井结果表明,减孔率15%~25%)。随后,滩相储层经历了两期埋藏岩溶作用,在烃类充注以及液态烃裂解时期内形成的酸性岩溶水,沿颗粒滩中残余的孔隙层以及同生、表生岩溶作用形成的孔洞层运移,对早期孔隙及孔洞充填物进行扩容,孔隙度增加至4%~12%(图10c)。该阶段主要是滩相储层孔隙的调整期,孔隙度变化最终趋于稳定。

5 结论

(1)川中地区下寒武统龙王庙组滩相储层分布广泛,储集性能良好。储集岩主要为砂屑白云岩、鲕粒白云岩与具残余颗粒结构的粉—细晶白云岩,储集空间主要包括粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔、铸模孔、残余粒间孔、裂缝及溶洞,喉道以缩颈型喉道为主,孔喉配置关系好,总体上表现为中低孔、低渗的孔隙型储层及裂缝—孔隙型储层。

(2)滩相储层形成机制研究表明,滩核和滩翼微相有利于储层发育,且沉积微相的平面分布使这种相控型碳酸盐岩储层在沉积早期就具有典型的宏观非均质性,这为储层的形成与演化提供了物质基础。同生岩溶作用控制了早期储层的孔隙演化,表生岩溶作用决定了储层分布的基本特征,埋藏岩溶作用有利于先期孔渗层的优化改造,三种岩溶作用对储层的影响具有连续性,形成的孔隙分布空间具有继承性,这种良好的时空耦合关系是区内龙王庙组滩相储层形成的根本原因。

(3)滩相储层演化经历了三个阶段。沉积—同生

溶改造阶段是滩相储层大规模增孔时期;埋藏成岩阶段为滩相储层孔隙调整时期,孔隙度变化最终趋于稳定。

参考文献

- [1] 李亚林,巫芙蓉,刘定锦,等. 乐山—龙女寺古隆起龙王庙组储层分布规律及勘探前景[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 61-66.
- [2] 刘树根,宋金民,赵异华,等. 四川盆地龙王庙组优质储层形成与分布的主控因素[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2014, 41(6): 657-670.
- [3] 徐春春,沈平,杨跃明,等. 乐山—龙女寺古隆起震旦系—下寒武统龙王庙组天然气成藏条件与富集规律[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 1-7.
- [4] 周进高,房超,季汉成,等. 四川盆地寒武系龙王庙组颗粒滩发育规律[J]. 天然气工业, 2014, 34(8): 27-36.
- [5] Davies G R, Smith L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1660.
- [6] Wierzbicki R, Dravis J J, Al-Aasm I, et al. Burial dolomitization and dissolution of Upper Jurassic Abenaki platform carbonates, Deep Panuke reservoir, Nova Scotia, Canada[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1843-1861.
- [7] Moyra E J, Wilson M J, Evans N H, et al. Reservoir quality, textural evolution, and origin of fault-associated dolomites[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(9): 1247-1272.
- [8] 朱光友,张水昌,梁英波. 四川盆地深部海相优质储集层的形成机理及其分布预测[J]. 石油勘探与开发, 2007, 29(4): 30-34.
- [9] 金民东,曾伟,谭秀成,等. 四川磨溪—高石梯地区龙王庙组滩控岩溶型储集层特征及控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 650-660.
- [10] 周进高,徐春春,姚根顺,等. 四川盆地寒武统龙王庙组储集岩形成与演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 158-166.
- [11] 唐浩,谭秀成,刘宏,等. 川中磨溪气田嘉陵江组“土黄色”粉晶云岩成因及其储集层形成机制[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(4): 504-512.
- [12] 许海龙,魏国齐,贾承造,等. 乐山—龙女寺古隆起构造演化及对震旦系成藏的控制[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(4): 406-415.
- [13] 冯增昭,彭勇民,金振奎,等. 中国早寒武世岩相古地理[J]. 古地理学报, 2002, 4(1): 1-12.
- [14] 姚根顺,周进高,邹伟宏,等. 四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律[J]. 海相油气地质, 2013, 18(4): 1-8.
- [15] 刘宏,谭秀成,李凌,等. 孔隙型碳酸盐岩储集层特征及主控因素——以川西南嘉陵江组嘉 5 段为例[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(3): 275-281.
- [16] 陈景山,李忠,王振宇,等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用与储层分布[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 858-868.
- [17] 杨雪飞,王兴志,杨跃明,等. 川中地区下寒武统龙王庙组白云岩储层成岩作用[J]. 地质科技情报, 2015, 34(1): 35-41.
- [18] Hollis C. Diagenetic controls on reservoir properties of carbonate successions within the Albian-Turonian of the Arabian Plate[J]. Petroleum Geoscience, 2011, 17(3): 223-241.
- [19] 罗冰,谭秀成,刘宏,等. 蜀南地区飞仙关组鲕粒滩储层成因机制分析[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 404-409.
- [20] Enos P, Sawatsky L H. Pore networks in Holocene carbonate sediments[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1981, 51(3): 119-127.

编辑:赵国宪

Characteristics and Genesis of Lower Cambrian Longwangmiao Beach-facies Reservoirs in Central Part of Sichuan Basin

Dai Lincheng, Wang Xingzhi, Du Shuangyu, Yang Xuefei, Yang Yueming

Abstract: Based on the analysis of core observation, conventional and cast slices, physical property analysis and mercury penetration, it is indicated that the Lower Cambrian Longwangmiao beach facies reservoirs that develop well in the central part of Sichuan Basin are composed of dolarenite, oolitic dolostone and the dolostone with residual particle texture. The pore space mainly includes intergranular dissolved pores, intragranular dissolved pores, intercrystalline dissolved pores, moldic pores, residual intergranular pores, fractures and vugs. Configuration between pores and throats are well in the reservoirs. The research on origin mechanism of the reservoirs indicates that beach-core and bank-wing microfacies are conducive to the development of the reservoirs. The feature of microfacies distribution in plane leads to the typical macroscopic heterogeneity of the reservoirs during early sedimentary stage, which provides good material foundation for formation and evolution of the beach facies reservoirs. It is suggested that the beach facies reservoirs went through three stages of karst diagenesis, i.e. the syndeposition, the epigenesis and the buried karstification. The syndepositional karstification controls the evolution of pores in the reservoirs formed during the early stage, which is critical to formation of good reservoirs. Epigenesis karstification determines the basic characteristics of reservoir distribution, when porosity increased in large scale. Buried karstification is favorable to the optimization of the porous beds formed previously.

Key words: Lower Cambrian; Longwangmiao Fm.; Beach facies; Carbonate reservoir; Reservoir characteristics; Reservoir genesis; Sichuan Basin

Dai Lincheng: Master degree in progress at Southwest Petroleum University. Add: School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Xindu, Chengdu, 610500, China